

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.В. ЛОМОНОСОВА
Государственный Астрономический институт
им. П.К. Штернберга

На правах рукописи

УДК 521.15

КИТИАШВИЛИ Ирина Николаевна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРАЩЕНИЯ
ВНЕСОЛНЕЧНЫХ ПЛАНЕТ И ПУЛЬСАРОВ**

Специальность 01.03.01 - Астрометрия и небесная механика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

МОСКВА-2004

Работа выполнена в Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта,
Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина

Научные руководители:

доктор физико-математических наук

СИДОРЕНКО
Владислав Викторович
(ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва)

кандидат физико-математических наук

ГУСЕВ
Александр Васильевич
(КГУ, Казань)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

Ксанфомалити
Леонид Васильевич
(ИКИ РАН, Москва)

доктор физико-математических наук

Марков
Юрий Георгиевич
(МАИ, Москва)

Ведущая организация:

Институт астрономии РАН, Москва

Защита состоится 14 октября 2004 г. в 14.00 на заседании Диссертационного
совета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
шифр Д.501.001.86

Адрес: 119992, Москва, Университетский проспект, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного
Астрономического **института им. П.К. Штернберга МГУ (Москва,**
Университетский проспект, 13).

Автореферат разослан 8 сентября 2004 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
Кандидат физ.-мат. наук



АЛЕКСЕЕВ С.О.

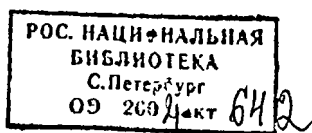
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Открытие планет вне Солнечной системы (экзопланет) стало началом новой эпохи развития и применения методов небесной механики. С момента обнаружения в 1992 г. первой экзопланеты к настоящему времени открыто 119 экзопланет в 104 планетных системах около звезд главной последовательности (ГП) и 5 планет около двух пульсаров. Среди открытых планетных систем 13 являются мультипланетными, в их состав входят 27 экзопланет. В 8 мультипланетных системах планеты обращаются в орбитальном резонансе. В них наблюдаются как резонансы порядков 2:1 (Gliese 876, HD 82943, HD 160691), 3:1 (55 Спс), 3:2 (PSR B1257+12), так и высоких порядков 5:1 (E And), 7:3 (47 Uma), 10:1 (HD 37124), 11:2 (HD 12661).

Экзопланеты с массами порядка массы Юпитера-Сатурна открыты только около звезд ГП и обращаются на расстояниях от 0.05 до 2 а.е. от звезды с периодами обращения от 1.2 до 5360 дней. Большие полуоси орбит планет с массами меньше массы Юпитера лежат в узком интервале от 0.02 а.е. (OGLE-TR-56) до 0.5 а.е. и составляет 39 % от всех обнаруженных планет, среди которых 26 планет имеют $a \sim 0.1$ а.е. По эллиптическим орбитам с $e > 0.3$ обращается 66 экзопланет, 22 имеют орбиты близкие к круговым орбитам ($e \sim 0.1$) и для 16 планет $e \sim 0$. Периоды обращения планет внесолнечного типа вокруг звезд ГП можно условно разделить на три группы: 1) короткопериодичные (< 30 дней) - 26 экзопланет, среди которых 20 имеют период обращения менее двух недель; 2) среднепериодичные (от 0.5 месяца до 3 лет) — 61 планета и 3) долгопериодичные (свыше 3 лет) — 30 планет.

Разнообразие динамических характеристик экзопланет ставит задачу детального изучения вопросов эволюции их вращения для широкого спектра значений параметров планетной системы с учетом возмущений как со стороны гравитационных, магнитных, так и приливных моментов. Особый интерес представляет класс экзопланет, обращающихся вокруг родительской звезды на



орбитах $ca \sim 0.02-0.5$ а.е. («горячие Юпитерианцы»), так как на их вращение существенное влияние оказывают приливные моменты.

Первая экзопланетная система была открыта около пульсара PSR B1257+12 при анализе вариаций времени прихода импульсов от звезды. Известно, что шкала времени пульсаров очень стабильна, поэтому периодические ее вариации могут быть объяснены тремя причинами: гравитационное влияние экзопланет, эффектами, связанными с внутренним строением нейтронной звезды, такие как колебания Ткаченко или свободной прецессией пульсара. Вариации наблюдаются у ряда пульсаров: PSR B1620-26, PSR 1828-11, PSR 0531+21 и других. Мы объясняем наблюдаемые вариации Чандлеровскими колебаниями - и свободной нутацией мантии нейтронной звезды. Обнаружение и анализ периодических изменений профиля и времени прихода импульса от изолированного пульсара PSR B1828-11, которые составляют 1000, 500, 250, и 167 дней, позволяет сделать вывод, что ось вращения нейтронной звезды свободно прецессирует [3]. Поэтому особенно актуальным является построение модели вариаций вращения нейтронных звезд с учетом их внутреннего строения: модели сверхплотного нейтронного вещества и дифференциального вращения мантии и коры пульсара.

Цели и задачи работы.

Настоящая работа имеет своей целью исследование особенностей вращения экзопланет и пульсаров:

1. Исследование вращательной эволюции экзопланет под действием гравитационных и магнитных возмущений для широкого спектра параметров.
2. Изучение поведения вектора кинетического момента экзопланеты под действием приливных возмущений со стороны родительской звезды методами качественного анализа.
3. Моделирование дифференциального вращения двухслойного пульсара для объяснения наблюдаемых долгопериодических вариаций импульсов, получения оценок периодов Чандлеровских колебаний, прецессии оси

вращения и сплюснутости нейтронной звезды в зависимости от модели сверхплотного нейтронного вещества.

Основной метод исследований.

Исследования проводились методами качественного анализа и теории бифуркаций динамических систем на плоскости, сфере и цилиндре, описывающих вращательную эволюцию экзопланетных систем.

Исследование дифференциального вращения твердой коры и жидкой мантии пульсаров проводилось в рамках гамильтонова подхода для описания вращения двухслойного деформированного пульсара, состоящего из твердой кристаллической коры и жидкой мантии.

Научная новизна работы состоит в

1. Исследовании методами качественного анализа и теории бифуркаций эволюционных уравнений, описывающих вращение динамически-симметричного небесного тела под действием гравитационных и магнитных моментов с учетом эволюции орбиты, полученные В.В. Белецким, для всех возможных значений динамических параметров экзопланетных систем.
2. Получении галереи фазовых портретов на плоскости и на сфере для всех значений параметров эволюционной системы уравнений • под действием основных возмущающих моментов; построении бифуркационных кривых и поверхностей, описывающих топологическую перестройку фазового пространства и разбиение пространства параметров. Подтвержден эффект В.В. Белецкого - смены прямого вращения на обратное вращение - для широкого диапазона динамических параметров экзопланетных систем.
3. Проведении анализа системы эволюционных уравнений В.В. Белецкого для динамически симметричной экзопланеты под действием приливных моментов. Построен фазовый портрет на плоскости и на цилиндре в конечной области фазового пространства динамической системы.
4. Исследовании вращательной эволюции двухслойной нейтронной звезды в рамках гамильтонова подхода Х. Хетини к дифференциальному вращению небесных тел; впервые теоретически получены две моды вариаций

вращения пульсаров - Чандлеровское колебание и свободная нутация мантии пульсара, которые согласуются с наблюдаемыми данными пульсара PSR 1828-11.

5. Моделировании динамических характеристик вращающейся нейтронной звезды на основе наблюдаемых вариаций вращения 7 пульсаров и получении оценок динамического сжатия нейтронных звезд для 7 моделей нейтронного сверхплотного вещества и различной массы пульсаров.

Научная и практическая значимость.

В работе представлен комплекс исследований вращательной эволюции экзопланетных систем и пульсаров на основе аналитического, качественного и бифуркационного подходов. Проведенный анализ галереи фазовых портретов дает широкий спектр эволюционных треков вращения внесолнечных планет, расширяющий космогонические сценарии образования и эволюции планетных систем. Анализ бифуркационных кривых динамических систем конкретизирует критические значения динамических параметров экзопланетных систем.

Проведенные исследования дифференциального вращения пульсаров позволяют объяснить наблюдаемые вариации излучения пульсаров, моделировать динамические и геометрические характеристики вращающейся нейтронной звезды и дает возможность уточнить реалистичные модели внутреннего строения нейтронной звезды из небесно-механических аспектов.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Галерея фазовых портретов на плоскости, сфере и цилиндре для всех значений параметров эволюционной системы уравнений под действием основных возмущающих моментов.
2. Построение бифуркационных кривых и поверхностей, описывающих топологическую перестройку фазового пространства, и разбиение пространства параметров эволюционных уравнений.
3. Модель вариаций вращения пульсаров - Чандлеровские колебания и свободная нутация мантии пульсара - в рамках дифференциального вращения двухслойной модели пульсара.

4. Моделирование динамических характеристик вращающейся нейтронной звезды на основе наблюдаемых вариаций вращения 7 пульсаров. Оценки динамического сжатия нейтронных звезд для 7 моделей нейтронного сверхплотного вещества и различной массы пульсаров.
5. Небесно-механическая интерпретация полученных фазовых портретов и бифуркационных кривых. Выявлен эффект смены прямого вращения экзопланет на обратное под действием гравитационных и магнитных возмущений.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях, симпозиумах и конгрессах: итоговые научные конференции КГУ 1999-2002, Казань; Международная конференция "Геометризация физики III, IV", 1997, 1999, КГУ, Казань; Международная конференция "JENAM 2000", МГУ, Москва, "JENAM 2002", Порту, Португалия; Международный конгресс по матфизике "ICMP 2000", Лондон, Великобритания; 24, 25 Генеральные ассамблеи МАС 2000, Манчестер, Великобритания; 2003, Сидней, Австралия; Всероссийская конференция "Новые результаты аналитической и качественной небесной механике", 2000, ГАИШ, Москва; 31-я зимняя школа «Saas-Fee Advanced lectures», 2001, Гримец, Швейцария; Всероссийская астрономическая конференция 2001, Санкт-Петербург; Международная конференция «АстроКазань'2001 — 100 лет АОЭ», КГУ, Казань; Европейская зимняя школа "Observing with the VLTT, 2002, Ле Зуш, Франция; Международная конференция EAAS "Международное сотрудничество в области астрономии", 2002, ГАИШ, Москва; Международная конференция «Scientific Frontiers in Research on Extrasolar Planets», 2002, Вашингтон, США; Международная конференция по теоретической физике «ТН 2002», Париж, Франция; Международная конференция «Небесная механика-2002: результаты и перспективы», ИПА, Санкт-Петербург; Коллоквиум МАС № 189 «Astrophysical Tides: Effects in the Solar and Exoplanetary Systems», 2002, Нанкин, Китай; Международная конференция «Modern theory of dynamical

systems and applications to theoretical celestial mechanics», 2002, МИАН, Москва; Международная конференция «Новая геометрия природы», 2003, КГУ, Казань.

Личный вклад автора.

Проводимые исследования охватывают широкий круг вопросов небесной механики, пульсарной астрономии и математики. В совместных публикациях диссертанту принадлежит: получение координат и типов состояний равновесия динамической системы, построение фазовых портретов на плоскости, сфере и на цилиндре, анализ и интерпретация явления миграции состояний равновесия в фазовом пространстве, построение и анализ бифуркационных кривых и поверхностей, вычисление оценок периодов Чандлеровских колебаний и нутации мантии пульсаров, моделирование и графическое представление динамического сжатия нейтронной звезды для наблюдаемых вариаций вращения 7 пульсаров.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Работа изложена на 201 странице, включает 130 рисунков (71 в приложениях А и Б), 25 таблиц (14 в приложении Б). Список литературы состоит из 185 библиографических ссылок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы ее основные цели и задачи, перечислены результаты работы, выносимые на защиту, указана их новизна, значимость и перспективы их использования, приведена структура и содержание диссертации.

В первой главе дается обзор теоретических достижений в исследовании вращения небесных тел. В параграфе 1.1 описываются основные этапы исследований вращательной эволюции небесных тел от работ Л. Эйлера, Дж.Л. Лагранжа, П.С. Лапласа до современности. Дан краткий обзор опубликованных работ по теории вращения, захвата в резонансное вращение и устойчивости вращения небесных тел. Выведены ключевые уравнения, описывающие нерезонансное вращение небесных тел. Параграф 1.2 включает

обзор современных данных об открытых планетах внесолнечного типа (экзопланет) около звезд главной последовательности и пульсаров, приводятся статистические распределения по основным характеристикам планетных систем. Описываются основные эволюционные теории, объясняющие наблюдаемые характеристики экзопланетных систем. Дается краткий обзор методов открытия и исследования экзопланет. Приводятся данные о действующих и готовящихся к старту космических и наземных миссиях и проектах. В параграфе 1.3 излагаются основные положения теории бифуркаций и качественного анализа, методы исследования динамических систем. В параграфе 1.4 представлен краткий обзор внутреннего строения нейтронных звезд и его зависимость от выбранного уравнения состояния равновесия сверхплотного вещества пульсара.

Во второй главе приводится описание исследования нерезонансного вращения динамически-симметричной планеты под действием основных возмущающих моментов. В параграфе 2.1 изложены, полученные В.В. Белецким, основные эффекты и закономерности вращательной эволюции планеты под действием гравитационных и магнитных моментов с учетом эволюции орбиты динамически-симметричного небесного тела. В параграфе 2.2 методами качественного анализа и теории бифуркаций исследуется динамическая система В.В. Белецкого, которая описывает вращательную эволюцию динамически-симметричной экзопланеты, намагниченной вдоль оси ее динамической симметрии, под действием гравитационных, магнитных моментов с учетом эффектов эволюции орбиты:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \alpha \cos y, \\ \dot{y} &= \beta - \alpha \operatorname{ctgx} \sin y + \gamma \cos x,\end{aligned}\tag{0}$$

где переменные x и y описывают поведение вектора кинетического момента экзопланеты в орбитальной системе координат, α и β - параметры, учитывающие влияние магнитных моментов и эволюции орбиты планет, параметр γ описывает влияние гравитационных моментов.

При исследовании (1) нами последовательно рассматривались все частные случаи, когда хотя бы один из параметров α , β или γ равен нулю, а затем общий случай: $\alpha \neq 0, \beta \neq 0, \gamma \neq 0$. Система уравнений (1) зависит от угловых переменных x и u , поэтому естественно изобразить полученные фазовые портреты на сфере.

Параграф 23 включает описание и анализ 64 фазовых портрета на плоскости и на сфере, иллюстрирующие разнообразную вращательную эволюцию экзопланет.

В случае, когда $\alpha = 0, \beta \neq 0, \gamma \neq 0$ фазовые портреты содержат «особую» траекторию, состоящую из особых точек (ОТ), рис. 1. В зависимости от соотношения параметров β и γ «особая», траектория перемещается относительно оси x , «сжимается» в одну особую точку на полюсе сферы и исчезает.

При $\alpha \neq 0, \beta \neq 0, \gamma = 0$ фазовые портреты на плоскости и на сфере обладают следующими свойствами: 1) все ОТ имеют характер центра; 2) при изменении соотношения параметров системы происходит смещение или разрушение ОТ; 3) фазовый портрет симметричен относительно центра сферы и начала координат на фазовой плоскости.

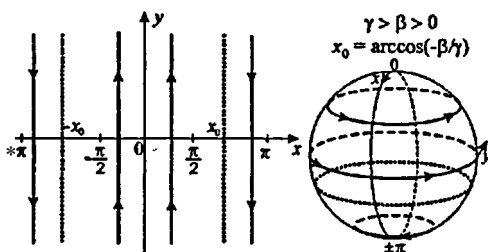


Рис. 1. Фазовый портрет при $\alpha=0, \beta \neq 0, \gamma \neq 0$.

В случае $\alpha \neq 0, \beta = 0, \gamma \neq 0$ структура фазовых портретов и их эволюция описываются свойствами: 1) в зависимости от соотношения параметров α и γ имеют место две или четыре особые точки; 2) слияние двух центров и седла, расположенного между ними, приводит к образованию топологически сложного седла или центра; 3) во время миграции ОТ и их бифуркации одно из состояний равновесия сохраняет свою структуру и положение на фазовом портрете. Вывод в пункте 1 подтверждает ранние исследования В.В. Белецкого [1].

Если выполняется неравенство $\alpha < \gamma$ ($\alpha > 0, \gamma > 0$), то фазовый портрет состоит из четырех ОТ: три из них имеют характер центра и одна - седла. Сепаратрисы седла разбивают поверхность сферы на три области, содержащие

по одному центру (рис. 2а). Аналогичный фазовый портрет, изображенный на рисунке 2а был получен так же Белецким В.В. [1]. Уменьшение параметра γ и увеличение α приводит к миграции двух центров к особой точке типа «седло». При значении $\gamma = \alpha$ два центра сливаются с образованием на месте простого седла топологически сложного седла (рис. 2б). Когда $\alpha > \gamma$, образовавшееся топологическое седло исчезнет с образованием на его месте центра (рис. 2в).

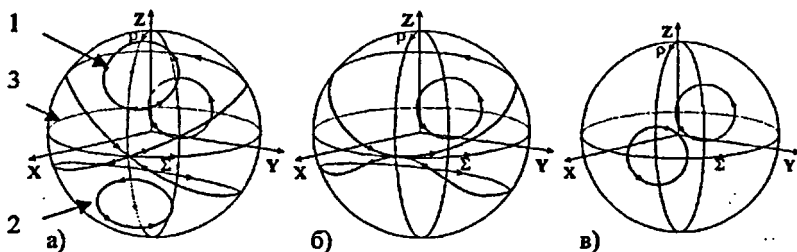


Рис. 2. Фазовые портреты при $\alpha \neq 0, \beta = 0, \gamma \neq 0$.

Случай $\alpha \neq 0, \beta \neq 0, \gamma \neq 0$ объединяет все выше перечисленные свойства для рассмотренных режимов: 1) $\alpha = 0, \beta \neq 0, \gamma \neq 0$; 2) $\alpha \neq 0, \beta \neq 0, \gamma = 0$; 3) $\alpha \neq 0, \beta = 0, \gamma \neq 0$. Условие $\beta \neq 0$ сохраняет тип ОТ, соответствующих случаю $\alpha \neq 0, \beta = 0, \gamma \neq 0$ и приводит к их смещению на малую величину. Исключение составляют только случаи, когда один из параметров равен нулю, так как это состояние равновесия соответствует набору из семи фазовых портретов, - уже описанных, при более простых соотношениях параметров.

Параграф 2.4 включает анализ бифуркационных кривых и поверхностей в нулевом, первом и втором приближениях, определяющих разбиение пространства параметров на топологически различные состояния равновесия.

Небесно-механическая интерпретация фазовых портретов, полученных в зависимости от соотношения гравитационных и магнитных возмущений, а также влияния эволюции орбиты, приведена в параграфе 2.5. Переменные x и y описывают изменение углов ρ и Σ , задающих мгновенное положение вектора кинетического момента планеты (рис. 3), независимой переменной служит средняя аномалия. Величины α, β, γ удовлетворяют соотношениям:

$$\alpha = k_z \sin \rho^*, \quad \beta = k_z \cos \rho^*, \quad \gamma = 2k_z,$$

где ρ^* - фиксированный угол, описывающий ориентацию невозмущенного вектора кинетического момента планеты \vec{L} в орбитальной системе координат XYZ (рис. 3), параметр k_z описывает эффекты, связанные с эволюцией орбиты планеты и взаимодействия магнитного поля планеты с внешним магнитным полем, k_z — учитывает возмущения гравитационной природы, M —средняя аномалия.

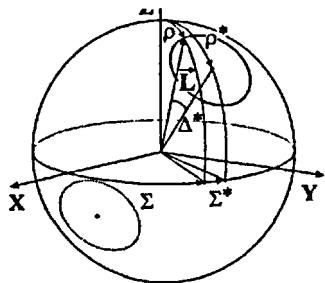


Рис. 3. Система координат.

При учете влияния только магнитных моментов и эволюции орбиты экзопланеты на сфере существует два состояния равновесия, в окрестности которых эволюция вектора \vec{L} представляет собой прецессию. Если угол $\rho^* = 0$ ($\alpha = 0, \beta \neq 0, \gamma = 0$) вращение планеты будет иметь характер прецессии вокруг нормали к плоскости орбиты. Данный результат ранее был получен Белецким В.В. [1]. В случае $\rho^* = 90^\circ$ ($\alpha \neq 0, \beta = 0, \gamma = 0$), вращение экзопланеты будет характеризоваться периодической сменой прямого вращения на обратное и наоборот. Учитывая влияние гравитационных возмущений, магнитных моментов и эволюции орбиты ($\alpha = 0, \beta \neq 0, \gamma \neq 0$) вращение планеты будет иметь характер прецессии вокруг нормали к плоскости ее орбиты. Данный эффект ранее был замечен Белецким В.В.

В случае $\rho^* = 90^\circ$ ($\alpha \neq 0, \beta = 0, \gamma \neq 0$) картина вращательной эволюции экзопланеты будет более разнообразной. При преобладающем влиянии гравитационных моментов ($k_z < 2k_z$) на сфере существуют четыре стационарные точки, три из которых являются устойчивыми (центры) и одна неустойчивая (седло). Сепаратрисы седла разбивают сферу на три области (рис. 2а). В первой вектор \vec{L} будет описывать прямое вращение планеты, во второй - обратное. В третьей области, расположенной между двумя сепаратрисами седла, вектор \vec{L} совершает либрационные колебания по вытянутым замкнутым траекториям с периодической сменой прямого вращения

планеты на обратное вращение (рис. 2а). По мере увеличения влияния гравитационных возмущений область либрации уменьшается за счет сближения сепаратрис седла, вызванная миграцией центров к нормали плоскости орбиты. Ослабление влияния гравитационных моментов по сравнению с магнитными и эффектами эволюции орбиты вызовет перемещение стационарных точек к состоянию равновесия «седло». Когда $k_z = 2k_g$ произойдет слияние двух центров и седла с образованием сложного седла.

Когда эффекты, связанные с эволюцией орбиты планеты и влияние магнитных моментов являются доминирующими по сравнению с гравитационными возмущениями ($k_z > 2k_g$), вектор кинетического момента будет прецессировать вокруг стационарной точки, лежащей в плоскости орбиты планеты.

При учете совместного влияния эффектов эволюции орбиты планеты, гравитационных и магнитных моментов ($\alpha \neq 0, \beta \neq 0, \gamma \neq 0$) все состояния равновесия будут смещены от полюса сферы к плоскости экватора. При преобладании гравитационных возмущений над другими выделяются следующие три области, определяемые характером вращения небесного тела: 1) область обратного вращения экзопланеты; 2) область прямого вращения с возможностью реализации режима периодической смены прямого вращения планеты на обратное; 3) область либрационного движения вектора кинетического момента, внутри которой прямое вращение планеты периодически сменяется на обратное. В случае $k_z = 2k_g$ слияние двух центров и седла вызовет его деформацию седла с сохранением зоны либрации. При преобладании возмущений со стороны магнитных моментов и эволюции орбиты $k_z > 2k_g$, ОТ с координатами $\Sigma = \frac{\pi}{2}, \rho = \frac{\pi}{2}$ и $\Sigma = \frac{3\pi}{2}, \rho = \frac{\pi}{2}$ будут смещены к одному полюсу ($\rho = \pi$) на малые углы $\frac{\beta}{\gamma - \alpha}$ и $\frac{\beta}{\gamma + \alpha}$.

Третья глава посвящена исследованию вращательной эволюции экзопланет под действием приливных моментов. В параграфе 3.1 описаны особенности влияния приливных моментов на вращательную эволюцию планет

и их спутников в Солнечной системе и экзопланет «горячих Юпитерианцев», которые обращаются по орбитам на расстоянии менее 0.5 а.е.

Параграф 3.2 включает краткое описание эволюционных уравнений, полученных В.В. Белецким, для планеты, обращающейся по круговой орбите с центральным эллипсоидом инерции близким к сфере. В данном параграфе методами качественного анализа нами исследуются эволюционные уравнения В.В.Белецкого [1], описывающие вращательную эволюцию планет при $e = 0$ под действием приливных моментов:

$$\begin{aligned}\frac{d\rho}{dt} &= \frac{\alpha_0}{2\zeta} \sin \rho (\zeta \cos \rho + 2) \\ \frac{d\zeta}{dt} &= -\frac{\alpha_0}{2} \left\{ \zeta (1 + \cos^2 \rho) - 2 \cos \rho \right\}\end{aligned}\tag{2}$$

где ρ угловое расстояние вектора кинетического момента от нормали к плоскости орбиты планеты, $\zeta = L/B\omega_0$, B - главный момент инерции планеты.

Согласно структуре системы уравнений (2), естественным отображением эволюционных треков на фазовой плоскости является цилиндр. Из четырех особых точек (табл. 1, рис. 4) две имеют характер седла, две - устойчивого и неустойчивого узлов. На рисунке 4 представлен фазовый портрет на плоскости и на цилиндре, иллюстрирующий эволюцию вектора кинетического момента экзопланеты под действием приливных возмущений. Две «втекающие» в седло сепаратрисы приходят из седла с координатами $\rho = \pi$, $\zeta = 0$, охватывают цилиндр и, следовательно, делят его на две части: «верхнюю» и «нижнюю». «Верхняя» часть характеризуется наличием устойчивого узла и приходом всех траекторий из бесконечности, «нижняя» - неустойчивого и «оттока» всех траекторий на $-\infty$. Таким образом, одна выходящая из седла ($\rho = 0$, $\zeta = 0$) сепаратриса вливается в устойчивый узел, другая уходит на бесконечность. Одна из входящих сепаратрис седла с координатами $\rho = \pi$, $\zeta = 0$ приходит из бесконечности, вторая — из неустойчивого седла.

В параграфе 33 приводится анализ и интерпретация полученного фазового портрета (рис. 4) на плоскости и на цилиндре, описываются

бифуркационная поверхность и ее сечения, определяющие различное поведение фазовых траекторий в окрестности состояний равновесия динамической системы, описывающей приливную эволюцию экзопланет.

Таблица 1. Состояния равновесия и типы особых точек.

Координаты ОТ	Δ	σ	Состояние равновесия
$\rho = 0, \zeta = 0$	$-\alpha_0^2$	0	седло
$\rho = 0, \zeta = 1$	$0.5\alpha_0^2$	$-1.5\alpha_0$	устойчивый узел
$\rho = \pm\pi, \zeta = 0$	$0.5\alpha_0^2$	$-1.5\alpha_0$	седло
$\rho = \pm\pi, \zeta = -1$	$-4.5\alpha_0^2$	$1.5\alpha_0$	неустойчивый узел

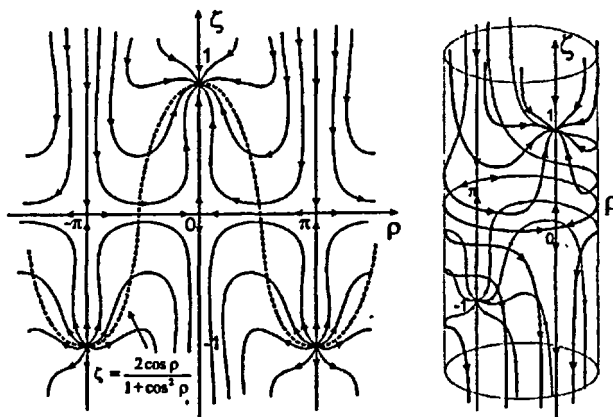


Рис. 4. Фазовый портрет, описывающий вращательную эволюцию экзопланеты под действием приливных возмущений.

Изменение поведения траекторий по ζ определяется кривой $\zeta = \frac{2 \cos \rho}{1 + \cos^2 \rho}$

(ранее полученной В.В. Белецким [1]) при пересечении вектором \vec{L} . Согласно полученному нами фазовому портрету вектор кинетического момента экзопланеты под действием приливных возмущений перемещается в направлении к плоскости орбиты планеты и приводит к смене прямого вращения экзопланеты к обратному при $L < B\omega_0$. В случае, когда $L > B\omega_0$, характер вращения планеты будет неизменным. Впервые эффект смены прямого вращения на обратное вращение планет был открыт В.В. Белецким [1].

В четвертой главе рассматривается проблема объяснения наблюдаемых вариаций вращения нейтронных звезд, которые могут быть интерпретированы гравитационным возмущением экзопланет (как у пульсара PSR B1257+12), волнами Ткаченко или дифференциальным вращением нейтронной звезды. В параграфе 4.1 приводится краткий обзор работ, посвященных наблюдениям и исследованиям вариаций вращения пульсаров, описываются наблюдаемые вариации вращения для семи пульсаров и возможные причины их возникновения.

Характерной особенностью излучения пульсаров является высокая стабильность времени прихода импульсов, поэтому анализ вариаций их временной шкалы позволяет детально исследовать динамику нейтронных звезд. Так, например, анализ наблюдений вариаций времени прихода импульсов (ВПИ) от пульсара PSR 1257+12 в 1992 г. привел к открытию первой экзопланетной системы. В настоящее время периодические вариации ВПИ наблюдаются у целого ряда пульсаров: PSR B1620-26, PSR 1828-11, PSR 0531+21, PSR B0833-45, PSR B0329+54, PSR B1937+21, PSR B1557-50. В излучении пульсаров наблюдаются флуктуации ВПИ с периодами от 25 до 6136 дней. Среди обнаруженных вариаций встречается комбинация нескольких периодических колебаний. Прецессия оси вращения пульсара может объяснить малую амплитуду наблюдаемых вариаций.

Существует три потенциальных объяснения вариаций излучения пульсара: 1) гравитационное возмущение одной или более экзопланет; 2) особенности внутреннего строения пульсара, связанные со структурой квантовых вихрей и волн Ткаченко; и 3) прецессия нейтронной звезды вследствие дифференциального вращения коры, мантии и ядра нейтронной звезды.

Наблюдение долгопериодических вариаций вращения пульсара являются мощным источником информации для исследования динамики и внутренней структуры нейтронных звезд. Поэтому обнаружение прецессии пульсаров представляет особый интерес.

В параграфе 4.2 описываются две модели вращения пульсара и вводятся основные уравнения для однородной и двухслойной прецессирующей нейтронной звезды, приводятся оценки динамического сжатия пульсаров, полученные различными авторами.

Параграф 4.3 посвящен обзору гамильтонова подхода к теории вращения небесных тел. Известно, что вращение земных планет, имеющих твердую мантию и эллиптическое жидкое ядро характеризуются свободной нутацией ядра. Согласно подходу Х. Хетино [2] взаимодействие ядра-мантии рассматривается как деформация тензора инерции ядра (инерционная' деформация) в соответствии инерционному сцеплению, введенному Я. Кубо [2] как некоторый «вращающийся тензор» для объяснения взаимодействия ядра и мантии Земли. При исследовании вращения нейтронных звезд нами был использован канонический метод Х. Хетино [2] с целью интерпретации наблюдаемых периодических вариаций ВПИ от пульсаров эффектами Чандлеровских колебаний и свободной нутации мантии.

По аналогии с понятиями Чандлеровских колебаний и свободной нутации ядра, принятыми для Земли, Марса и Луны, под Чандлеровскими колебаниями динамически-симметричного пульсара (CW) мы понимаем движение оси вращения пульсара вокруг его динамической оси, определяемой главным моментом инерции, в направлении вращения звезды, возникающее по причине несовпадения оси вращения нейтронной звезды с ее динамическими осями (собственные векторы тензора момента инерции пульсара). Свободная нутация жидкой мантии пульсара (FMN) описывает дифференциальное вращение жидкой мантии относительно твердой коры пульсара при несовпадении их осей вращения (рис. 5). Данная мода может иметь место только при наличии жидкой мантии.

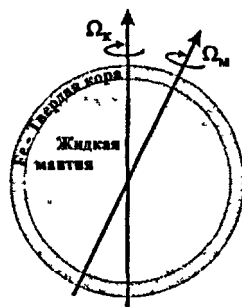


Рис. 5. Двухслойная модель нейтронной звезды.

В параграфе 4.4 описывается моделирование вращения нейтронных звезд с целью получения оценок их динамического сжатия, периодов Чандлеровских колебаний и свободной нутации мантии пульсаров для различных уравнений состояния сверхплотного вещества и массы нейтронной звезды. В рамках гамильтонова подхода Х. Хетинго к дифференциальному вращению небесных тел [2] мы рассматриваем свободное вращение динамически-симметричного пульсара ($A = B \neq C$, $A_m = B_m \neq C_m$), состоящего из эллиптической жидкой мантии и твердой коры, без возмущений со стороны других тел — так называемое Эйлерово вращение (рис. 5). Данная модель приводит к появлению двух дополнительных мод в движении полюса вращения тела: Чандлеровские колебания и свободная нутация мантии пульсара, что позволяют объяснить наличие двух гармоник вариаций времени прихода импульсов от пульсаров. Зависимость величины периода Чандлеровских колебаний (CW) от соотношения главных моментов инерции пульсара и его динамического сжатия имеет вид:

$$P_{CW} = P_{psr} \frac{A_r}{(C - A)} = P_{psr} \frac{A_r}{A} \left\{ \frac{C}{A} - 1 \right\}^{-1}, \quad (3)$$

где P_{psr} - период вращения пульсара.

Период свободной нутации мантии пульсара (FMN) вносит дополнительную периодическую модуляцию в наблюдаемые отклонения от стандартной модели замедления вращения нейтронной звезды. Величина свободной нутации мантии есть функция отношения момента инерции мантии пульсара к моменту инерции всего пульсара и ее динамического сжатия:

$$P_{FMN} = -P_{psr} \frac{A_r}{A} \left\{ \frac{C_m}{A_m} - 1 \right\}^{-1}. \quad (4)$$

В настоящее время к изолированным прецессирующим пульсарам относят: PSR 0531+21, PSR B0833-45, PSR B1642-03, PSR B1828-11, PSR B1557-50. Кроме того, наблюдаются вариации времени прихода импульса также у PSR 1257+12, интерпретированные как гравитационные возмущения трех экзопланет с массами порядка массы Земли, и вариации PSR B0329+54.

Для каждого из семи пульсаров нами исследовалась зависимость периода Чандлеровских колебаний и периода свободной нутации мантии пульсара от величины его динамического сжатия коры и мантии. В данном моделировании мы используем четыре модели внутреннего строения нейтронных звезд, которые характеризуются массой пульсара - $1.33 M_{\odot}$ и различными уравнениями состояния вещества разной степени жесткости: уравнением Рейда (R), Бете-Джонсона (BJ), уравнением среднего поля (MF) и уравнением тензорного взаимодействия (П1). Для различных значений масс пульсаров, лежащих в интервале от $0.73 M_{\odot}$ до $1.85 M_{\odot}$ (модели T12, T13, T11, T14), мы моделируем также величину периодов Чандлеровских колебаний и нутации пульсара, а также оцениваем величину динамического сжатия коры и мантии нейтронных звезд, полагая, что их внутреннее строение описывается уравнением тензорного взаимодействия.

Используя наблюдательные периодические вариации ВПИ от PSR B1828—11: 1000, 500, 250, 167 дней с помощью уравнений (3) и (4) нами были получены оценки величины динамического сжатия коры и мантии пульсара для 7 моделей нейтронной звезды. Сравнение полученных оценок динамического сжатия коры и мантии PSR B1828-11 для наблюдаемых вариаций показаны на рис. 6. С увеличением жесткости выбранного уравнения состояния вещества значение динамического сжатия пульсара увеличивается.

Аналогичным образом, используя известные наблюдательные данные ВПИ для семи пульсаров, мы моделируем влияние эффектов, связанных с Чандлеровскими колебаниями и свободной нутацией мантии пульсара, и оцениваем динамическое сжатие коры и мантии 7 пульсаров для 7 моделей нейтронных звезд (табл. 2).

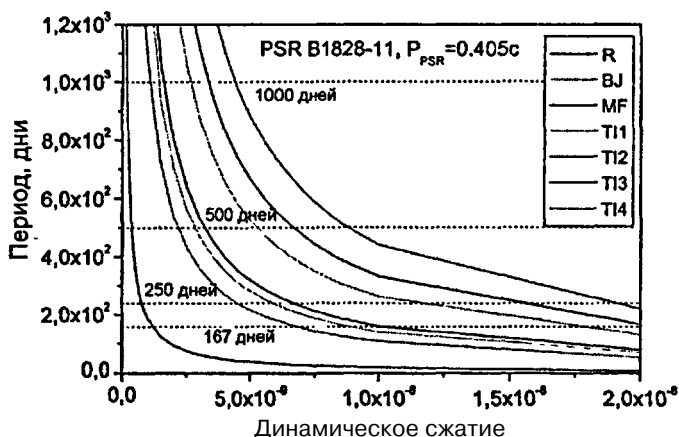


Рис. 6. Оценка величины динамического сжатия PSR B1828-11 и ее мантии для наблюдаемых значений вариаций.

Анализ полученных данных позволил нам выделить следующие закономерности:

1. с увеличением периодов Чандлеровских колебаний и свободной нутации мантии пульсаров величина динамического сжатия коры и мантии монотонно уменьшается.
2. с выбором более жесткого уравнения состояния вещества динамическое сжатие твердой коры и сверхтекучей мантии пульсара увеличивается (PSR B0833-45 – $P_{CW} = 165$: $\epsilon \sim 2.5 \cdot 10^{-10}$; $P_{FMN} = 5000$: $\epsilon \sim 1.3 \cdot 10^{-10}$ для наиболее мягкого уравнения состояния материи - уравнения Рейда; для уравнения жесткого состояния материи - уравнения тензорного взаимодействия динамическое сжатие составляет соответственно $\epsilon \sim 35 \cdot 10^{-10}$ и $\epsilon \sim 17 \cdot 10^{-10}$).
3. Величина динамического сжатия твердой коры пульсара, периоды Чандлеровских колебаний и свободной нутации мантии монотонно увеличиваются при увеличении массы нейтронной звезды.
4. Для более старых пульсаров ($t = 10^6$ лет) характерно уменьшение величины динамического сжатия независимо от выбранной модели внутреннего строения нейтронных звезд: (PSR B1557-50, $t = 0.60 \cdot 10^6$ лет,

$P_{CW}^{модель} \sim 100$ дней: $\varepsilon \sim 7 \cdot 10^{-10}$ (R-модель), $\sim 1 \cdot 10^{-8}$ (Tl1-модель);

PSR B0833–45, $t = 10^4$ лет, $P_{CW}^{модель} \sim 100$ дней: $\varepsilon \sim 2 \cdot 10^{-10}$ (R-модель),
 $\sim 5.5 \cdot 10^{-9}$ (Til-модель).

Табл. 2. Сводная таблица динамического сжатия коры и мантии пульсаров в соответствии с наблюдаемыми периодами Чандлеровских колебаний и свободной нутации мантии.

Пульсар	Периоды ВПИ		$\varepsilon, 10^{-10}$						
			RD	BJ	MF	Tl1	Tl2	Tl3	Tl4
PSR B1557–50 $P = 193$ мс $t = 0.60 \cdot 10^6$ лет	P_{CW}	800	1,12	6,42	9,49	15,6	26,2	19,8	18,7
	P_{FMN}	1600	0,558	3,21	4,75	7,82	13,1	9,91	9,36
PSR B0833–45 $P = 89$ мс $t = 10^4$ лет	P_{CW}	165	2,50	14,4	21,2	35,0	58,7	44,3	18,7
	P_{FMN}	330	1,25	7,18	10,6	17,5	29,3	22,2	9,36
PSR B0329+54 $P = 715$ мс $t = 5 \cdot 10^6$ лет	P_{CW}	1205	2,75	15,8	23,3	38,5	64,6	48,8	20,6
	P_{FMN}	6136	0,539	3,10	4,59	7,55	12,7	9,58	4,05
PSR B1828–11 $P = 405$ мс $t = 0.11 \cdot 10^6$ лет	P_{CW}	167	11,2	64,6	95,4	157	264	199	84,2
	P_{FMN}	250	7,50	43,1	63,8	105	176	133	56,3
PSR B1642–03 $P = 388$ мс $t = 3.4 \cdot 10^6$ лет	P_{CW}	667	2,69	15,5	22,9	37,7	63,3	47,8	20,2
	P_{FMN}	1000	1,80	10,3	15,3	25,1	42,2	31,9	13,5
PSR B0531+21 $P = 33$ мс $t = 10^3$ лет	P_{CW}	122	1,25	7,20	10,6	17,5	29,4	22,2	9,39
	P_{FMN}	488	0,313	1,80	2,66	4,38	7,36	5,56	2,35
PSR B1257+12 $P = 6.2$ мс $t = 8 \cdot 10^8$ лет	P_{CW}	25,34	1,13	6,51	9,63	15,9	26,6	20,1	8,50
	P_{FMN}	66,54	0,431	2,48	3,67	6,04	10,1	7,66	3,24

В заключении описываются основные результаты и выводы по всей диссертационной работе.

В приложении А диссертации приведена галерея из 64 фазовых портретов на плоскости и на сфере, разбиение пространства параметров.

В приложении Б диссертации представлены результаты численного моделирования периодов Чандлеровских колебаний и свободной нутации мантии, динамического сжатия 7 пульсаров для 7 моделей внутреннего строения нейтронных звезд.

Список основных публикаций автора по теме диссертации

Статьи

1. Gusev A., Kitiashvili I. Spin-orbital evolution of the exoplanets. EAS Publ. Series, EDP Sciences Publisher. France. - 2003 - v.6 - pp. 281-283.
2. Kitiashvili I., Gusev A. Exoplanets: status and outlook, Georesources. Kazan. KSU. - 2000. - v.3 - p. 26-30.
3. Gusev A., Kitiashvili I. Resonances in the exoplanetary systems and free-core nutation of pulsar PSR B1828-11 /Journal of Dynamical and Control Systems, Plenum Publishing Corp., USA.-January 2004-v. 10, No. 1.- pp. 120-122.
4. Gusev A., Kitiashvili I. Early evolution of the planetary system around PSR B1257+12 / ASP Conf. Series "Planetary systems in the Universe", ASP Publisher, USA. - 2004. - v.303 - p. 187-189.
5. Kitiashvili I., Gusev A. Extra-solar planets: from direct rotation into reverse rotation / ASP Conf. Series "Planetary systems in the Universe". ASP Publisher, USA. - 2004. - v.303 - p. 205-207.
6. Gusev A., Kitiashvili I. Rotation of extra-solar planets: qualitative and bifurcation analysis - I. Proc. Int. Conf. "Geometrization of Physics IV", Part I. Kazan, Russia, October 4-8, 1999, Kazan, Russia, Kazan Univ. Press, pp.115-123.
7. Gusev A., Kitiashvili I. Rotation of extra-solar planets: qualitative and bifurcation analyses - II. Proc. of Int. Conf. "Geometrization of Physics IV", Part II. October 4-8, 1999, Kazan, Russia, Kazan Univ. Press, 2000. pp.131-143.
8. Gusev A., Kitiashvili I. Long-term, highly periodic variations and Free-Core Nutation of pulsar. Proc. of Int. Conf. "New Geometry of Nature", August 25-September 5, 2003, Kazan, Russia, Kazan Univ. Press, 2003. - v. 3 - pp. 80-87.
9. Gusev A., Kitiashvili I. Extra-solar planets systems and life out the Earth / Proc. of Int. Conf. "New Geometry of Nature", August 25-September 5, 2003, Kazan, Russia, Kazan Univ. Press, 2003. - v. 3 - pp. 71-79.
10. Kitiashvili I., Gusev A. Investigation of the protoplanetary disk around of the neutron stars by VLTI / Proc. of Int. Conf. "New Geometry of Nature", August 25-September 5, 2003, Kazan, Russia, Kazan Univ. Press, 2003. - v. 3 - pp. 120-125.

Тезисы конференций

1. Gusev A., Petrova N., Kosulnikova I. Resonance rotation of planets in magnetic field of the pulsar B1257+12: qualitative and bifurcation analysis /A. Gusev, // Proc. Int. Conf. Geometrization of Physics ПГ, Kazan, Russia, October 1-5, 1997.-p. 37.
2. Kitiashvili I., Gusev A. Rotation of extra-solar planets by action of gravitational and magnetic interaction / Abs. of Joint European and National Astronomical Meeting "JENAM 2000", May 29 - June 3, Moscow. - p. 163.
3. Gusev A., Kitiashvili I. Non-resonance early evolution of the planetary system around PSR B1257+12 interaction / Abs. of Joint European and National Astronomical Meeting "JENAM 2000", May 29 - June 3, Moscow. - p. 94-95.
4. Kitiashvili I., Gusev A. Direct and reverse of the exoplanets rotation / Abs. of Int Congress of Math. Physics "ICMP 2000", July 17 - 22, London, UK. - p. 31.

5. Gusev A., Kitiashvili I. Qualitative and bifurcation analysis of the extra-solar planets rotation / Abs. of Int Congress of Math. Physics "ICMP 2000", July 17 -22, London, UK. - p. 31.
6. Gusev A., Kitiashvili I. Extra-solar planets: from direct rotation into reverse rotation / Abs. of Int. Congress of Math. Physics "ICMP2000", July 17-22, London, UK.-p.44.
7. Kitiashvili I., Gusev A. Early evolution of the planetary system around PSR B1257+12 / Abs. of Int. Congress of Math. Physics "ICMP 2000", July 17 - 22, London, UK. - p. 46.
8. Гусев А., Китиашвили И. Спин-орбитальная эволюция планетных систем / Тезисы конференции "Новые результаты аналитической и качественной небесной механики", 2000, ГАИШ, Москва. - с. 33.
9. Китиашвили И., Гусев А. Планетные системы: наблюдения и моделирование / Тезисы конференции "Новые результаты аналитической и качественной небесной механики", 2000, ГАИШ, Москва. - с. 44.
10. Gusev A., Kitiashvili I. Evolution of protoplanetary disk and capture in resonance rotation of the exoplanets / Abs. of All-Russian Astronomical Conference", August 6 - 12, 2001, St. Petersburg, Russia. - p. 56.
11. Kitiashvili I., Gusev A. Extra-solar planets: modern status and perspectives / Abs. of All-Russian Astronomical Conference", August 6 - 12, 2001, St. Petersburg, Russia. - p. 89.
12. Gusev A., Kitiashvili I. The hunt for the extra-solar planets by VLTI / Abs. of Scientific conference "International collaboration in astronomy: actual state and prospective in the frame of EAAS 6th general meeting", May 25 June 2, 2002, MSU, Moscow, Russia. - p. 20.
13. Gusev A., Kitiashvili I. Resonance rotation of the extra-solar planets / Abs. of Scientific Frontiers in Research on Extrasolar Planets, June 18-21, 2002, Washington D.C. USA. - p. 36.
14. Kitiashvili I., Gusev A. Spin-orbital rotation of exoplanets in a protoplanetary disk / Abs. of Scientific Frontiers in Research on Extrasolar Planets, June 18-21, 2002, Washington D.C. USA. - p. 50.
15. Gusev A., Kitiashvili I. Qualitative and bifurcation analysis of the resonance rotation of extra-solar planets around PSR B1257+12 / Abs. of TH 2002: International Conference on Theoretical Physics, July 22-26, 2002, Paris, France.-p. 194.
16. Kitiashvili I., Gusev A. Phase portraits gallery of the extra-solar planets rotation / Abs. of TH 2002: International Conference on Theoretical Physics, July 22-26, 2002, Paris, France. - p. 317.
17. Kitiashvili I., Gusev A. Fine structure of protoplanetary disk around optic pulsars for extrasolar planets detection by VLTI / Abs. of JENAM 2002, Workshop: The Very Large Telescope Interferometer Challenges for the Future, 2-7 September, 2002, Porto, Portugal - p. 131.
18. Gusev A., Kitiashvili I. Chandler Wobble and free core nutation of neutron stars / Abs. of Int. Workshop Celestial Mechanics -2002: Results and Prospects. 10 -14 September 2002, St. Petersburg, Russia.-p. 81.

19. Kitiashvili I., Gusev A. Gravitational, Magnetic and Tidal Interactions in Spin-Orbital Rotation of Exoplanets / Abs. of IAU Colloquium No.189 Astrophysical Tides: Effects in the Solar and Exoplanetary Systems, September 16-20, 2002, Nanjing, China. - p. 14.
20. Gusev A., Kitiashvili I. Capture in resonance rotation of the exoplanets by tidal interaction / Abs. of IAU Colloquium No. 189 Astrophysical Tides: Effects in the Solar and Exoplanetary Systems, September 16-20, 2002, Nanjing, China, - p. 8.
21. Gusev A., Kitiashvili I. Orbital Resonances of Exoplanets and Stability of Disk / Abs. of the 25th General IAU Assembly, July 13-26, 2003, Sydney. - p. 81.
22. Kitiashvili I., Gusev A., Richichi A. VLTI: modern status and perspectives / Int. Conf. "New Geometry of Nature", August 25 - September 5, 2003, Kazan Univ. Press, vol. 3. - p. 126.

Литература..

1. Белецкий В.В., Хентов А.А. Резонансные вращения небесных тел / Нижний Новгород, Нижегородский гуманитарный центр, 1995. - 430 с.
2. Gonzalez A-B., Getino J., The rotation of a non-rigid, non-symmetrical Earth I: Free nutations / Celest Mech. & Dyn. Astr., 68, 1997. - 139-149.
3. Stairs, I. H., Lyne, A. G., Shemar, S. L. Evidence for free precession in a pulsar. Nature, 406, 2000. - pp. 484-486.

Автор выражает искреннюю благодарность научным руководителям А.В.Гусеву и В.В.Сидоренко за постоянную поддержку и участие в работе, а также Н.Г.Ризванову и Н.К.Летровой за многочисленные плодотворные обсуждения. Автор признателен своим коллегам из отдела Фотографической астрометрии Астрономической Обсерватории им. В.П.Энгельгардта, во взаимодействии с которыми сформировалось его понимание научных проблем, рассматриваемых в диссертации. Большое значение имело внимание, проявленное к данной работе Ю.В.Баркиным, В.В.Белецким, Р.И.Киладзе, Л.В.Ксанфомалити, В.М.Малофеевым.

Подписано в печать 31.08.2004
Усл. печ. 1,48
Формат 60х84/16. Тираж 100 экз. Заказ 8/65
Отпечатано в типографии Издательского Центра
Казанского государственного университета
г. Казань, ул. Университетская, 17

№ 16045